

THÈSES

présentées à la Faculté des Sciences
de l'Université de Clermont
pour obtenir
le titre de Docteur-Ingénieur
par

P. LACOMBE

PREMIÈRE THÈSE

**Le Massif Basaltique de Ratanakiri (Cambodge)
et ses gisements de zircons-gemmes, son substratum,
sa place en Indochine et dans le Monde**

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 29 juillet 1967 devant le jury composé de :

MM. M. ROQUES, Professeur, Président,
P. LAPADU-HARGUES, Professeur,
M. CHENEVOY, Professeur à la Faculté des Sciences
de Lyon,
R. LAUTEL, Ingénieur au Bureau de Recherches
Géologiques et Minières



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546606_0016

THÈSES

présentées à la Faculté des Sciences

de l'Université de Clermont

pour obtenir

le titre de Docteur-Ingénieur

par

P. LACOMBE

PREMIÈRE THÈSE

Le Massif Basaltique de Ratanakiri (Cambodge)
et ses gisements de zircons-gemmes, son substratum,
sa place en Indochine et dans le Monde

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 29 juillet 1967 devant le jury composé de :

MM. M. ROQUES, Professeur, Président,

P. LAPADU-HARGUES, Professeur,

M. CHENEVOY, Professeur à la Faculté des Sciences
de Lyon,

R. LAUTEL, Ingénieur au Bureau de Recherches
Géologiques et Minières



LE MASSIF BASALTIQUE QUATERNAIRE DE
RATANAKIRI (Cambodge Nord-Oriental)
ET SES GISEMENTS DE ZIRCONS-GEMMES
ASSOCIES ; SON SUBSTRATUM, SA PLACE
EN INDOCHINE ET DANS LE MONDE

par

P. LACOMBE

°
° °

(Texte résumé ; le texte intégral sera publié
dans le Bulletin du B.R.G.M.).

PERSONNEL FACULTE DES SCIENCES ANNEE SCOLAIRE 1966-1967

Doyen : M. ROQUES Maurice

1er Assesseur : M. SAUREL Jean

2e Assesseur : M. RAOULT Gaston

PROFESSEURS

M.	RAMBAUD René	Chimie	T
M.	BLANC Eugène	Mécanique Rationnelle	T
M.	ROQUES Maurice	Géologie	T
M.	LAPADU-HARGUES Pierre	Minéralogie	T
M.	TRUFFAULT Robert	Chimie Organique	T
M.	LUTZ Hubert	Biologie Animale	T
M.	RAOULT Gaston	Physique	T
M.	CHAMPAGNAT Paul	Physiologie Végétale	T
M.	DUPLESSIS-KERGOMARD Alain	Chimie	TP
M.	AVAN Louis	Physique Expérimentale	T
M.	PARIAUD Jean-Charles	Chimie Physique	T
Mme	HENNEQUIN Françoise	Mathématiques	T
Melle	BERTHET Ginette	Physique	TP
M.	LOISEAU Jean	Botanique	T
M.	COMBE René	Physique	TP
M.	DE PUYTORAC Pierre	Zoologie	T
Mme	AVAN Madeleine	Physique	TP
Melle	DONDON Marie-Louise	Chimie Physique	TP
M.	DELOST Paul	Physiologie Animale	TP
M.	SAUREL Jean	Physique	TP
M.	VIALARD André	Chimie	TP
M.	KOHLMULLER Robert	Chimie Minérale	T
M.	GUILLAUME Marcel	Algèbre	T
M.	COMBE Jean	Physique Générale	T

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M.	PETERLONGO Jean-Marc	Géologie
M.	BAILLAUD Lucien	Botanique
M.	VESSIÈRE Roger	Chimie
M.	BATHIER Marcel	Physique
Melle	UCHER Suzanne	Chimie
M.	HENNEQUIN Paul-Louis	Mathématiques
M.	FALGAS Maurice	Mathématiques
M.	ROCHE Jean-Etienne	Physique
M.	MARTINET Pierre	Chimie
M.	MAISONNEUVE Jacques	Géologie
M.	CAPESTAN Michel	Chimie
M.	LENOIR Marcel	Mathématiques

MAITRES DE CONFERENCES

M.	THOMAS Jean	Physique
M.	BERNARD Maurice	Physique
M.	JOYON Louis	Zoologie
M.	ISABELLE Didier	Physique
M.	CAUBERE Paul	Chimie
M.	SOULAGE René	Géophysique Générale
M.	DUFAURE Jean-Paul	Biologie Animale

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

M.	CHADEYRAS Marcel	Mathématiques
M.	BADRIKIAN Albert	Mathématiques
Mme	BESSERRE Anne-Marie	Mathématiques
M.	BOILLAT Guy	Mathématiques
M.	ARIBAUD François	Mathématiques
M.	LE THANH Phong	Mathématiques

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE

M.	VO-KHAC Khoan	Mathématiques
----	---------------	---------------

ATTACHEE PRINCIPALE

Mme	CHOPART Marie-Louise
-----	----------------------

DEUXIEME THESE

L'Etain dans le Sud-Est Asiatique (Birmanie, Malaisie, Thaïlande, Indonésie)

Vu et approuvé

CLERMONT-FERRAND, le 6 Juillet 1967

Le Doyen,

M. ROQUES

Vu et permis d'imprimer

CLERMONT-FERRAND, n° 38/67

Le Recteur de l'Académie,

E. LAPALUS

INTRODUCTION

Le Massif volcanique de RATANAKIRI et ses gisements de zircons-gemmes ont été étudiés au cours des campagnes 1965-66 de prospection générale de la Mission Minière Française dans le cadre des accords de Coopération Bilatérale Franco-Cambodgienne.

Les travaux de laboratoire et de synthèse ont été effectués en France en 1966 et 1967 grâce au B.R.G.M., au Département de Géologie et de Minéralogie de la Faculté des Sciences de Clermont, à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne et à de nombreux laboratoires et concours particuliers.(1)

Les gisements de zircons-gemmes de Bo Kéo (Cambodge) ont été découverts il y a plus de 40 ans par les autochtones et mis en valeur par les Birmans, spécialistes des gemmes en Asie.

La région, autrefois partie orientale de la province de Stung Treng et érigée par le Prince Sihanouk en province de Ratanakiri, forme l'extrémité Nord Orientale du ROYAUME DU CAMBODGE.

Développement scientifique, économique et social de la région :

Les faits marquants sont les suivants :

- Prospection et exploitation par orpaillage épisodique depuis le XIX^e siècle.
- Lever de la carte géologique au 1/500.000^e de l'Indochine, de 1929 à 1933 (E. Saurin et Bonelli).
- Découverte des premiers gisements de zircons vers 1925, connus en 1932 seulement par les autorités administratives.
- Etudes rapides des exploitations en 1935 (E. Saurin) et en 1957 (E. de Chatelat).
- Lever de la carte photogéologique au 1/400.000^e du Cambodge par P. Bleser et P. Coelewijn (1961-62)
- Ouverture de la route fédérale N° 19 en 1938
- Création de la Province de RATANAKIRI en 1958 et colonisation

(1) - L'auteur remercie tout particulièrement, pour leur bienveillance et leur concours, Messieurs

M. Roques, le corps professoral et le personnel du Département de Géologie et de Minéralogie de la Faculté des Sciences de Clermont,

Heng Long, Directeur du Service des Mines et, à travers lui, le Gouvernement Royal du Cambodge présidé par Samdech Sachivin Norodom Sihanouk, Chef de l'Etat,

H. Nicolas, alors Directeur Général, J. Lespine, Directeur, R. Lautel, Chef de Département, et le personnel des laboratoires du B.R.G.M.

L. Neltner, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne le corps professoral et le personnel de l'Ecole,

M. Chenevoy, professeur à la Faculté des Sciences de Lyon,

A. Roche, professeur à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg et son personnel,

J. Leplat, Chef de Service au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Lille,

G. Branche, Chef du Service de Minéralogie du C.E.A.,

Poyet, Ingénieur, et Gaucher, Opérateur, sur Microsonde de Castaing.

progressive des tribus montagnardes (Jaraï, Tampuon, Kravet, Biet, Brao Krung, etc...) et développement de l'hévéaculture et du café.

- Elaboration d'une politique rationnelle des exploitations de gemmes (1965-67).

- En 1937, la production de gemmes de Ratanakiri atteignait 90.000 piastres, soit 4 fois la valeur des saphirs extraits du célèbre gisement de PAILIN (Cambodge Nord-Occidental).

Problèmes posés par les gisements de zircons, propos de cet ouvrage

Les minéraux rencontrés (zircons, corindons, grenats, picotites, magnétites,), leur grande taille et leurs occurrences réparties sur plus de 1.000 km² d'un massif basaltique jamais étudié en détail, posent un problème que les théories génétiques de A. Lacroix (1922 et 1933), bâties à propos d'autres gisements analogues de France et d'Indochine, résolvent mal.

Le présent travail se propose de définir avec exactitude le contexte pétrographique, géochimique et vulcanologique de ces gisements ainsi que leurs caractéristiques gîtologiques, géologiques, minéralogiques cristallographiques et paragénétiques, afin de les comparer à d'autres gisements analogues (Cambodge, Thaïlande, Taïwan, Madagascar et France) et de tenter une interprétation génétique.

Ière et IIème PARTIES

CADRE GEOGRAPHIQUE

CADRE GEOLOGIQUE DU SUBSTRATUM ANTE-BASALTIQUE

Situation et données géographiques : le Massif volcanique occupe les parties centrales et sud-orientales de la province entre les parallèles 13°10 et 14°00 et le méridien 106°45 et la frontière Vietnamienne.

La capitale provinciale Ratanakiri-Ville (également chef-lieu du srok Lomphat) est reliée aux autres chefs-lieu de srok (Bo Kéo et Voeune Saï) par deux axes routiers d'importance inégale, la route N19 (Mékong-Mer de Chine) et la route N 23 (Nord-Sud).

Le Plateau de Bo Kéo, élément essentiel du massif, s'inscrit entre les cours des deux fleuves Sé San au nord et Srê Pok au sud, tous deux affluents du Mékong. Les affluents drainent la totalité du Massif de façon centrifuge. A l'est, au niveau de la frontière Vietnamienne, il est séparé par quelques vallées secondaires du massif basaltique de Pleiku.

Le climat est tropical humide à alternance de deux saisons.

La population est composée de Montagnards d'Indochine Centrale et d'éléments de colonisation d'abord laotiens puis khmers, en tout de 50 à 60.000 habitants.

La végétation, suivant la nature des sous-sols et l'altitude, forme des forêts claires ou denses, primaires ou secondaires (dans les zones de cultures itinérantes).

Les cultures occupent les riches terres rouges basaltiques du plateau et les terres alluviales de berges.

Géologie et structure du substratum : le massif repose sur une plate-forme complexe dans laquelle on distingue plusieurs unités géologiques dont l'altitude varie entre 100 et 500 m :

- un môle cristallin calédonien, extrémité sud-occidentale du massif vietnamien de Kontum, avec quelques granites tardi-hercyniens circonscrits
- des tables et reliefs rhyolitiques des Indosinias Inférieures
- des tables calcaires permienes au coeur d'anticlinaux gréseux,
- un pays mésozoïque gréseux (Indosinias Moyennes du Trias Supérieur et du Lias), fortement plissé au nord, plus calme au sud et enveloppant ces divers blocs,
- des plaines et terrasses alluviales partiellement cuirassées et perturbées par des mouvements verticaux récents de la fin du Tertiaire et du Quaternaire dont certains sont liés au volcanisme.

IIIème PARTIE

Le volcanisme basaltique

Plateau de Bo Kéo, de Ban Chay et Annexes

Le volcanisme basique, associé aux mouvements tectoniques récents, a marqué tout le Quaternaire.

Par son étendue, le Massif de Ratanakiri se classe au 5ème rang des massifs volcaniques indochinois, tandis que par son altitude, il est intermédiaire entre les "Hauts Plateaux" des massifs anciens et les "Bas Plateaux" des plaines alluviales et côtières.

Il se compose d'un grand plateau central, Bo Kéo, entre les deux fleuves, étagé entre 200 et 400 m, horizontal et discordant sur le substratum succinctement décrit plus haut, et du Plateau de Ban Chay à cheval sur la frontière vietnamienne au nord de la Sé San, dépourvu de gisement connu et seulement parcouru bien qu'il appartienne à la même période de volcanisme continental.

L'activité volcanique s'est manifestée en plusieurs phases, dont certaines sont très récentes, marquant une évolution nette du type fissural vers le type purement explosif. Les épanchements fissuraux créèrent une mince plateforme, assez régulière, que les phases suivantes ont perturbée et hérissée de petits volcans dispersés typiques du volcanisme atlantique (A. Rittmann, 1963). Les épanchements l'ont même débordée pour installer dans les plaines environnantes de petits systèmes d'activité éphémère.

La pétrographie est monotone et comprend des roches basaltiques S.l., des terres rouges profondes et fertiles et des cuirasses latéritiques de divers types associées à des niveaux alluviaux et éluviaux intercalaires.

La forte teneur en zirconium des produits volcaniques et surtout le nombre et l'importance des gisements de gemmes qui leur sont associés en font l'originalité et, partant, l'intérêt scientifique et économique.

CHAPITRE 1

GENERALITES ET MORPHOLOGIE DU MASSIF

- 1 -- Géométrie d'ensemble : Le massif basaltique est construit sur un substratum en forme de plateau étagé entre 200 et 250 m d'altitude (base des premières coulées), dominé par les montagnes rhyolitiques de Bo Loi partiellement recouvertes et bordé au nord de la Sé San par la chaîne gréseuse plissée, elle-même en position de couverture sur le môle paléozoïque de Kontum.

L'érosion périphérique a réduit la superficie du massif de 3.200 à 1.500 km² actuels, tandis que l'épaisseur globale, variant de 40 à 80 m, témoigne d'un volume d'épanchement de 150 km³ environ.

L'indice d'explosivité a une valeur moyenne de 50, mais il a varié dans le temps de 0 à 100 (pourcentage de pyroclastites dans les émissions,

- 2 - Les coulées : les témoins laissés dans le sud par l'érosion montrent que les premières coulées, plates et étendues, atteignaient 40 m de puissance. Leurs dimensions et leurs formes se sont ensuite diversifiées dans une topographie de plus en plus tourmentée.
- 3 - Les appareils volcaniques : on dénombre plus de 80 appareils mesurant de 0 à 130 m d'altitude relative pour moins de 3 km de diamètre à la base. Ils appartiennent à tous les types caractéristiques du volcanisme atlantique : cônes de lapillis et de cendres, cratères, égueulés ou non, cratères d'explosion gazeuse, rares dépressions volcano-tectoniques et toutes les combinaisons possibles des éléments précédents.
- 4 - Répartition des centres d'émission : la disposition de ces appareils paraît très aléatoire ; cependant ils ont tendance à se regrouper le long de quelques axes préférentiels nord-sud ou à concavité tournée vers le nord-est (Ya Lom - Thong Samoth, Bo Kéo, - Bo Loi, Bo Khâm - Ban Chay, Lomphat - Ban Dong Magnieung) et quelques transversales (Bo Noac - Bo Tum) actifs tout au long du volcanisme.
- 5 - Le recouvrement de terres rouges : comme sur la plupart des massifs basaltiques d'Indochine, une partie du plateau et du substratum environnant est recouverte de terres rouges, profondes aux abords des volcans.

Ces terres sont étudiées dans le Chapitre 3.

CHAPITRE 2

PETROGRAPHIE ET CHIMISME DU VOLCANISME

La jeunesse relative du massif fournit à l'observation un bon choix de matériaux, non seulement de laves mais aussi de scories, bombes, enclaves et produits ultimes de l'activité qui font souvent défaut dans les systèmes volcaniques profondément érodés du reste de l'Indochine.

Une cinquantaine d'échantillons (choisis parmi plusieurs centaines) ont été étudiés au microscope, par analyse chimique (éléments majeurs et traces), microsonde de Castaing et diffractométrie.

Les types pétrographiques appartiennent presque uniquement à la famille des basaltes à olivine sensu lato avec quelques termes basanitiques à analcime, limburgitiques ou trachybasaltiques.

La série est nettement alcaline, saturée ou sous-saturée, avec quelques coulées de transition contaminées (indice de Peacock = 47,5).

Quelques andésites, gabbros et microgabbros calco-alcalins ou alcalins relativement anciens de la région sud-ouest n'ont pas de rapport évident avec le reste du massif (magmatisme différent ou intrusions et extrusions préalables ?)

I - DIVERS TYPES DE ROCHES EFFUSIVES ET INTRUSIVES

Ces roches comprennent des basaltes calco-alcalins ou à affinité calco-alcaline moins potassiques que sodiques, des basaltes alcalins saturés ou sous-saturés avec un groupe alcalin sodique très pauvre en potassium.

On rencontre encore un laccolite de gabbro sans rapport magmatique avec le massif (région de Lomphat) et des andésites ou microgabbros affleurant sous les coulées de plateau. Malgré certaines analogies pétrographiques avec les laves, leurs rapports stratigraphiques ne sont pas évidents.

Chaque groupe de laves, en général peu différenciées, a son équivalent plus évolué : trachy-andésite à oligoclase pour les basaltes alcalins, trachybasalte limburgitique pour les coulées alcalines, andésite quartzifère pour le groupe calco-alcalin, andésite sodique pour le groupe sodique.

II - ARCHITECTURE DES LAVES ET SCORIES

- 1 - Aspect et texture : les roches vacuolaires sont relativement rares même à la partie supérieure des coulées. Les enclaves du socle et de péridotites et les phénocristaux croissent en fréquence de bas en haut dans la série et plus encore dans les amas et dykes des volcans.

Les scories et ponces sont alternativement noires ou rouges suivant le degré d'oxydation du fer. Le type sodique se reconnaît à ses nombreuses olivines iddingsitisées et à des tâches blanchâtres sphéroïdiques. La trachy-andésite à oligoclase de Bo Pay Nang se distingue par sa couleur gris-verdâtre.

- 2 - Structure : d'après la terminologie de Pizigo (B.R.G.M. 1965), on rencontre les structures suivantes :
 - s. hyalopilitique et intersertale sans fond de feldspaths xénomorphes
 - s. microlitique porphyrique et intersertale à feldspaths xénomorphes

III - MINÉRALOGIE DES LAVES ET SCORIES

- 1 - Péridots (chrysolite et forstérite) : ils sont omniprésents. La microsonde a permis d'étudier l'iddingsitisation : la teneur en Magnésium et en silice diminue tandis que la teneur en fer croît très rapidement ; c'est un phénomène d'altération secondaire. On note aussi une altération complexe en phyllites diverses. Certains gros péridots proviennent des enclaves de péridotites.
- 2 - Pyroxènes : le bronzite est toujours en xénocristaux corrodés ou couronnés d'augite. Cette dernière est normale ou faiblement aegyrinique ou titanifère.
- 3 - Plagioclases : ceux-ci sont rares en phénocristaux et couronnés d'anorthose. Dans le fond, ce sont des microlites de labrador ou de bytownite exceptionnellement de l'oligoclase dans la trachy-andésite.

Tous ces feldspaths contiennent du potassium (oligoclase = $\text{Or}_{25}\text{Ab}_{65}\text{An}_{10}$, andésine = $\text{Or}_{15}\text{Ab}_{65}\text{An}_{20}$).

- 4 - Anorthose : certains macrocristaux atteignent 10 cm de long. La formule la plus courante est $Or_{20-25}Ab_{80-75}$ (formule vérifiée au photomètre de flamme et au diffractomètre)

Il semblerait qu'au cours de la cristallisation la teneur en potassium augmente ; une enclave dans un zircon de Bo Kéo contenait $Or_{50}Ab_{50}$.

Certaines sont couronnées d'augite, d'autres englobent des micas (dans la trachy-andésite à oligoclase)

L'anorthose est un minéral assez typique des basaltes alcalins.

- 5 - Feldspathoïdes et analcime : la néphéline n'a pas été mise en évidence. En revanche l'analcime est fréquente en petits cristaux xénomorphes.
- 6 - Zéolites : fréquentes dans certaines roches (trachy-andésite, basaltes sous-saturés), les zéolites sont des phillipsites et des mésotypes.
D'après des analyses à la sonde électronique, nous aurions aussi des heulandites et des chabasies.
- 7 - Micas et amphiboles basaltiques, chlorites : hormis ces cristaux intratelluriques, les volcans ont rejeté des blocs de Biotite titanée (lépidomélane ou annite), indicateurs des "beaux" zircons dans les gîtes.
- 8 - Les oxydes métalliques : la magnétite titanée existe à l'état de grains automorphes ou en gros cristaux ($Fe/Ti = 2 \text{ à } 7$). L'ilménite est rare. L'oligiste donne des paquets de fibres biréfringentes. La cristallisation a donné dans certains cas des dentrites entourant les microlites de plagioclases (saturation du bain résiduel en fer).

Dans les scories et graviers, on trouve encore des picotites et ferropicotites de grande dimension, automorphes ou xénomorphes.

- 9 - Minéraux accessoires : (apatite, zircons, corindons, grenats, sphène) : La richesse exceptionnelle en phosphore se traduit par l'abondance d'apatite, aciculaire ou prismatique, dans la mésostase, tandis que la trachy-andésite contient de gros cristaux d'apatite grise à inclusions sphériques semblables à celles des carbonatites d'Oka (Canada).
Les zircons sont rares en cristaux macroscopiques, blancs ou bruns, anguleux ou arrondis. Dans le fond on distingue de très fréquents micro-grains dont beaucoup sont des zircons de très petites dimensions. Les corindons et grenats n'ont jamais été vus en place dans les laves (leur fréquence dans les gisements est nettement inférieure à celle des zircons).
Le sphène est visible dans la mésostase des roches les plus alcalines en cristallites losangiques très plats.
- 10 - Le fond vitreux : très souvent, la proportion de verre est grande, voire prédominante ; le fond peut être incolore, partiellement dévitrifié en cristallites divers et en plages de feldspaths xénomorphes - l'altération secondaire y produit des phyllites colorées en vert-.
Le fond peut être surchargé en fer et titane ; l'apparition des derniers microlites de plagioclases a précipité les oxydes opaques en faisceaux de dentrites complexes et en fibres d'oligiste.
Quoiqu'il en soit, le fond est riche en potassium.

IV - LES ENCLAVES

Aucune enclave profonde du socle n'a été trouvée.

Les deux catégories rencontrées comprennent :

- des péridotites du manteau, en éclats et polyèdres variés, parfois de grande dimension, dont les minéraux peuvent être libérés dans la lave encaissante (bronzite, picotites, olivines entourées de couronnes kéliphytiques ou corrodées).

Les teneurs en éléments traces sont les suivantes (en p.p.m.) :

Cr = 920-980, V = 32-93, Zr = 19-57, Ti = 1.400 - 2.000 ppm

- des xénolites du substratum : granites, rhyolites, grès, alluvions, parfois entourés d'une auréole réactionnelle dans les laves, intacts dans les scories. Aucune de ces enclaves ne contient de zircons, corindons ou grenats.

V - CHIMISME DES LAVES ET SCORIES : ELEMENTS MAJEURS

- 1 - Des compositions moyennes ainsi que quelques exemples types sont donnés dans le tableau I.
- 2 - La composition chimique moyenne est celle d'un basalte alcalin mésocraté, faiblement sous-saturé, pauvre en alumine, riche en fer (surtout ferrique), en magnésium et en phosphore, plus sodique que potassique.
Le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$, élevé comme dans tous les basaltes alcalins est encore plus fort dans les scories.
L'étude du rapport Na/K (1,73 en moyenne), permet de distinguer un groupe de laves sodiques d'appareils très pauvres en potassium Na/K = 5, en moyenne). Quelques laves très évoluées (1 et 2 du tableau) montrent la tendance au cours de la différenciation des magmas.
- 3 - Caractéristiques chimiques : définition de la série magmatique de Ratanakiri

L'examen des diverses teneurs en oxydes par rapport à la teneur en silice (% en poids) ou par rapport à l'indice de solidification de H. Kuno (1959), $\text{s.i.} = M = 100 = \text{MgO} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$, ou encore les unes par rapport aux autres, permet de dégager certaines particularités énumérées ci-après :

$$- (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) = 43 - 0,65 \text{ SiO}_2 \pm 1,5$$

- Indice de Peacock (1939) ou indice d'alcalinité vaut $47,5 = \text{SiO}_2$ pour $\text{CaO} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7 \%$, valeur caractéristique d'une série alcaline.

$$- \text{Les diagrammes de H. Kuno (1960) } \text{Al}_2\text{O}_3 = f_{\text{SiO}_2} (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

indiquent encore, qu'à de rares exceptions près, toutes les roches appartiennent au domaine alcalin.

- Le diagramme de Wager et Deer (1939) ou diagramme AFM montre que les quelques roches sortant du domaine alcalin sont des roches calco-alcalines sensu-stricto c-a-d des roches alcalines contaminées par le substratum.

- L'indice de série de H. Kuno (1959) ou alcali-lime index vaut $M = 24,5$ pour $\text{CaO} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7 \%$. Ces valeurs sont encore caractéristiques d'une série alcaline. Les valeurs élevées de $\text{s.i.} = M$ montrent que, dans l'ensemble, les roches sont très peu différenciées et proches du magma initial.

- Les diagrammes de Niggli donnent pour valeur de l'isofalie :

si = 158, fm = al = 31. La courbe moyenne alc est intermédiaire entre celles des séries atlantique typique et pacifique typique.

- enfin les indices calco-alcalin et sodi-potassique (Jung et Brousse 1958),

$R(Si) = (K + Na) / (K + Na + Ca)$ et $S(Si) = K / (Na + K)$ montrent qu'à de rares exceptions près la série est sous-saturée et alcaline. Les exceptions sont les roches considérées comme contaminées.

En conclusion, le massif volcanique de Ratanakiri comprend essentiellement une série moyennement alcaline, plus sodique que potassique, très peu évoluée - (M varie de 18 à 45), dont les roches ont une composition voisine de celle du magma initial, et quelques roches récentes plus évoluées et nettement sous-saturées, un groupe alcalin sodique et quelques roches calco-alcaline par contamination par le substratum parmi les coulées anciennes ou d'âge intermédiaire.

Indice de Peacock = 47,5

Indice de Kuno = 24,5

pour $CaO = Na_2O + K_2O = 7\%$

Isotalie si = 158

fm = al = 31

4 - Composition minéralogique normative - classification de Lacroix

La gamme des paramètres est :

II à IV (4) 5 à 6, 1 à 4, 4 à 5, 2 à 3, 1 à 5, 1 à 2, (1) 2 à (2) 3 !, les valeurs les plus fréquentes étant

III 5, 3, 4 !2, 2, 2, 2!, basalte alcalin à peu près saturé, plus sodique que potassique à olivine, calco-magnésien à diopside et,

III 5, 3, 4 !2, 2, 2, 2, !, basalte saturé sodique à hypersthène et diopside (basalte tacheté sodique).

5 - Conclusions : si on compare les indices de série avec la classification de Lacroix on remarque que cette dernière ne permet pas de conclure sur la nature de la série (présence simultanée de basaltes A, B, B')

VI - COMPARAISON ENTRE LA NORME ET LE MODE

Ici la norme n'exprime qu'imparfaitement le mode car, les plagioclases rencontrés sont légèrement potassiques et, surtout plus basiques que la norme, l'orthose normative s'exprimant en fait en anorthose et, d'autre part, de nombreux minéraux ne sont pas normatifs comme l'augite, la biotite, les amphiboles, les zéolites. De plus, le degré d'oxydation du fer amène à fabriquer du quartz virtuel et des oxydes au lieu de silicates.

VII - PETROGRAPHIE DYNAMIQUE ET VULCANOLOGIE

1 - Les phénocristaux sont des minéraux intratelluriques (anorthose et minéraux à groupement oxyhydrile) ou provenant directement de périclase (bronzite et diopside, périclase associés, picotites). La bronzite peut également cristalliser dans un réservoir profond avec des minéralisateurs vers 925°.

Ces phénocristaux seront ensuite corrodés ou couronnés d'augite zonée devenant progressivement titanifère ou aegyrinique.

Dans le cas général l'éruption se produit à ce stade précoce de la différenciation : le magnésium restant donne encore de petits péridots, puis, surtout, de l'augite en baguettes contemporaine des plagioclases basiques et des minéraux. La zonation des plagioclases montre l'enrichissement progressif du bain résiduel en alcalins et l'appauvrissement en alumine et en chaux ; les carbonates sont les derniers minéraux à se former.

Si le liquide est plus riche en alcalins et pauvre en fer, il restera un résidu à composition feldspathique peu coloré.

Si dans le réservoir terminal la différenciation peut se poursuivre, en présence de minéralisateurs, les barylites s'élimineront, le feldspath évoluera vers l'oligoclase et il se formera des biotites et des amphiboles.

Les grands cristaux d'anorthose peuvent se former à ce moment (certains englobent des biotites de grande dimension). Le bain sous-saturé, sous pression de minéralisateurs et potassique, formera des zéolites et de l'analcime : cas de la trachy-andésite à oligoclase et analcime (à composition de mugearite).

2 - Le problème du verre : diverses considérations physico-chimiques ou empiriques amènent à conclure que,

- dans les roches alcalines pauvres en silice, la cristallisation fractionnée entraînera un déficit en alumine et une saturation en alcalins

- si la silice ou l'alumine viennent à manquer et s'il n'y a pas de minéralisateurs, le fond restera vitreux, très alcalin et parfois basique sans feldspaths xénomorphes ni zéolites (cas du n° 1, trachybasalte limburgitique)

- dans les roches plus siliceuses, l'anorthose et les plagioclases acides cristalliseront en dernier en plages xénomorphes, ou bien, il restera un verre incolore,

- s'il y a des minéralisateurs (eau et gaz carbonique) la silice et l'alumine disparaîtront peu à peu ; la présence de chaux et de soude empêchera la formation de leucite et de néphéline et seules les zéolites se formeront avec des carbonates.

- les verres les plus basiques n'exsudent que des microlites de pyroxène augite et sont stables, les verres plus siliceux s'altèrent en phyllites variées.

Des analyses de verres alcalins à la microsonde ont révélé les caractères suivants :

- absence totale de magnésium
- teneur en silice inférieure ou égale à celle d'un pyroxène
- teneur en alumine inférieure à celle d'une zéolite
- teneur en chaux très faible
- teneur en potassium notable
- teneur en fer très variable

VIII - COMPOSITION CHIMIQUE : ELEMENTS MINEURS

Le chrome, le zirconium et le vanadium ont été dosés systématiquement en roche totale.

1 - teneur en chrome : la teneur moyenne, qui va de 270 ppm à 100 ppm pour les roches évoluées, est une fonction à peu près linéaire de la solidification et est très élevée ; A.E.J. Engel (1965) y voit la preuve d'un volcanisme à petits réservoirs sans différenciation poussée, ce qui concorde avec les autres caractéristiques de Ratanakiri.

	Ensemble du massif	Coulées	Volcans	1	2	α	β	β'
SiO ₂	45,80 (40,50 - 52,75)	46,55 (42,65 - 52,75)	45,17 (40,50-49,60)	49,10	49,60	48,71	45,04	44,11
Al ₂ O ₃	11,97 (8,20 - 15,85)	11,70 (9,70 - 14,70)	12,20 (8,20-15,85)	14,70	15,85	11,97	11,22	11,44
Ox _{Fe} de	13,02 (7,45 - 16,55)	12,45 (7,45 - 14,45)	13,50 (11,85-16,55)	10,90	9,45	11,76	13,45	13,89
MgO	9,56 (4,00 - 12,20)	10,08 (5,30 - 12,20)	9,13 (4,00-11,50)	5,30	4,00	8,50	10,57	10,70
CaO	9,12 (5,95 - 11,40)	9,25 (6,40 - 10,35)	9,00 (5,95-11,40)	6,40	5,95	9,17	9,25	9,75
Na ₂ O	3,06 (2,00 - 6,60)	3,01 (2,00 - 6,60)	3,11 (2,20- 4,40)	6,60	4,40	2,68	2,61	3,15
K ₂ O	1,57 (0,57 - 3,90)	1,57 (0,57 - 3,10)	1,57 (0,55- 3,90)	3,10	3,90	1,09	1,42	1,56
TiO ₂	2,33 (1,30 - 3,00)	2,14 (1,60 - 2,70)	2,50 (1,30- 3,00)	2,00	1,30	2,24	2,50	2,39
P ₂ O ₅	1,21 (0,70 - 1,60)	1,01 (0,70 - 1,40)	1,38 (1,30- 3,00)	1,30	1,50	1,12	1,16	1,24
Fe ₂ O ₃	1,29 (0,35 - 6,47)	0,89 (0,35 - 2,32)	1,74 (0,78-6,47)	0,70	1,26	1,33	1,22	1,18
FeO						(NA ₂ OK ₂ O)		
Na/K	1,73 (1,01 - 5,85)	1,71 (1,28 - 4,47)	1,76 (1,01--5,85)	1,9	1,01	2,46	1,84	2,02
s. i.	35 (18 - 46)	37 (21 - 46)	33,4 (18 - 40)	21	18	35,4	37,8	36,6
Zr	525ppm (260-1.180)	477ppm (260 - 920)	556ppm (295 - 1.180)	920ppm	1.180			
Cr	(110ppm - 335ppm)			110ppm	115			
Zr/Cr	(0,95 - 10,35) moyenne de 1,6 pour les roches peu évoluées.			8,35	10,3			

1 - trachybasalte limburgitique

2 - trachy-andésite à oligoclase et analcime

α, β, β' : moyenne des basaltes des types considérés

N.B.- Le rapport Na/K varie de 4,10 à 5,85.

Les teneurs en Zr varient de 295 à 470ppm, les teneurs en Cr, de 265 à 280ppm,

le rapport allant de 1,05 à 2,24 pour les basaltes sodiques.

TABLEAU 1 - Quelques compositions chimiques de roches de
KATANAKIRI

- 2 - teneur en vanadium : comprise entre 200 et 300 ppm cette teneur est normale et habituelle pour des basaltes alcalins ; elle diminue dans les roches plus évoluées.
- 3 - teneur en zirconium : ces teneurs seront discutées avec la géologie des gisements. On peut remarquer déjà qu'elle varie dans le même sens que la richesse en chrome (sauf dans les roches les plus évoluées), et en sens contraire de la teneur en vanadium. La raison de ce phénomène n'est pas claire.

IX - COMPARAISON DU VOLCANISME DE RATANAKIRI AVEC CEUX D'INDOCHINE ET DU RESTE DU MONDE

- 1 - A. Lacroix (1922 et 1933) a donné de bonnes études de laves d'Indochine qu'il classe en basaltes α , β , β' . E. Saurin a émis l'hypothèse que les basaltes α sont les plus anciens, les basaltes β' les plus récents. D'après les études récentes, les basaltes α à pigeonite seraient des tholeiites, les basaltes β' , sous-saturés, à enclaves de péridotites, à zéolites et analcime seraient des basaltes alcalins ou trachybasaltes.
Il faudrait voir là deux séries magmatiques différentes se succédant dans le temps et dans les mêmes massifs.
Les laves de Ratanakiri se distinguent par leur richesse en fer, magnésium et phosphore et leur pauvreté en silice et alumine.
- 2 - La comparaison avec les basaltes océaniques étudiés par A.E.J. Engel accentue encore cette particularité : le rapport Na/K est normal, mais la richesse en zirconium est très élevée, tandis que le rapport K/Zr est intermédiaire entre la moyenne des tholeiites et celles des basaltes alcalins (25 au lieu de 14 et 42).
- 3 - Les magmas de Ratanakiri ont donc une composition chimique particulière, entraînant leur grande richesse en olivine (magnésium) et un déficit en silice et alumine qui les rend alcalin.
- 4 - Ces particularités pourraient s'expliquer par l'assimilation d'une péridotite à mica et amphibole (Zvarickij), riche en phosphore par un magma tholeiitique. Cette hypothèse expliquerait-elle l'abondance de zirconium ? Il semble que non.

X - EVOLUTION DE L'INDICE DE SOLIDIFICATION ET DES CARACTERES DU VOLCANISME

La première phase est de type fissural : les coulées de base ont donc un s.i très élevé et peu de minéralisateurs.

L'activité a alors changé d'aspect : la montée du magma primaire s'est arrêtée abandonnant une multitude de poches superficielles évoluant chacune pour son propre compte ; les produits et manifestations volcaniques varient d'une coulée à l'autre, d'un volcan à l'autre, tandis que des produits différenciés apparaissent.

CHAPITRE 3

ALTERATIONS, CUIRASSES ET TERRES ROUGES

Ces trois types de formations ont une importance primordiale car ils conditionnent la géomorphologie (modèle arrondi du plateau, nappes aquifères, dessin du réseau hydrographique, érosion) et la géologie des gisements (gîtes secondaires liés à la terre rouge ou aux altérations).

En Indochine, les travaux antérieurs sont dus à des pédologues, Y. Henry 1931, E.M. Castagnol 1952, M. Schmid 1963 et des géologues, E. Saurin (diverses publications) et alter. Aucun d'entre eux n'a décrit Ratanakiri.

Les facteurs physico-chimiques essentiels sont :

- la nature du matériau originel (basalte, scorie, alluvions)
- le climat et les précipitations
- les conditions de drainage (bon ou mauvais, rythmique ou non, vertical, oblique ou horizontal)
- la porosité, la perméabilité des terrains, la percolation des solutions et les échanges chimiques qui en découlent (les réactions d'oxydoréduction du fer, et la solubilité de la silice surtout).

Altération des minéraux et mobilisation des éléments : en raison du climat et de la latitude, Ratanakiri est entièrement soumis au processus d'altération ferralitique aboutissant à la formation de cuirasses et carapaces latéritiques sans aller jusqu'à la bauxitisation comme au Laos, Plateau des Bolovens, plus septentrional (E. Saurin et J.P. Carbonnel 1964).

I - ALTERNATIONS SUPERFICIELLES DES BASALTES

- 1 - Pentes à drainage facile par ruissellement : la roche se désagrège en donnant des blocs et un sol noir "pseudorenzine" ou "régur squelettique" alcalino-terreux sans carbonate. La densité est de 2,7 pour les terres noires, 2,4 pour les terres rouges d'altération de scories. La courbe granulométrique est quasi-rectiligne, le matériau non classé, on y rencontre les placers de pentes.
- 2 - Altérations en croûtes ferrugineuses (drainage facile en toute saison) Le fer libéré précipite bientôt et les blocs se recouvrent d'une croûte ferrugineuse qui se transforme en patine protectrice à l'exondement. Sinon, le fer se remet en mouvement cycliquement et la roche se décolore.
- 3 - Altérations écailleuses, en "pelures d'oignons" (drainage plus difficile, assèchement plus lent, oxydation moins poussée). L'alternance d'imbibitions et de dessiccations en milieu peu oxydant en est la cause. La roche reste gris bleuté.
- 4 - Altération en argile bleutée (milieu toujours humide et saturé) : La structure de la roche subsiste, les minéraux sont épigénisés par les argiles (kaolinite) néoformées. On distingue des sols à gleys au centre des dépressions et des gleys à concrétions à la périphérie avec des sols marmorisés.

- 5 - Altérations des basaltes sur coulée imperméable horizontale : les sols correspondants sont des terres grises et des terres brunes basaltiques sols à pseudo-gleys à engorgement non permanent. Dans les bas-fonds où l'évaporation est complète, les concrétions dégagées par le ruissellement finissent par se souder en cuirasses.

II - LES CUIRASSES COMPACTES D'ACCUMULATION ABSOLUE

Par action additive du battement des nappes et du lessivage oblique, il se forme des cuirassés pisolitiques ou bréchiques.

Des cuirasses de ce type se forment également dans les alluvions ; elles sont alors quartzeuses (latéritoïdes d'Indochine).

III - ALTERATIONS PROFONDES DES ROCHES BASALTQUES ET SOLS FERRALITIQUES : TERRES ROUGES ET CARAPACES DIVERSES

Les altérations et transformations précédentes se produisent près de la surface de la roche ; l'altération profonde ferralitique est un phénomène différent, très fréquent et de grande ampleur à Ratanakiri comme ailleurs en Indochine.

1 - Conditions requises

- le milieu doit être perméable sur une grande hauteur.
- la porosité doit être telle que l'humidité permanente reste sensiblement constante tout au long de l'année (une dessiccation périodique et une oxydation poussée entraînent la formation de cuirasse, tandis qu'une saturation permanente crée l'argile bleue)
- les solutions doivent pouvoir percoler sur une grande hauteur pour propager l'altération en profondeur.

La roche doit donc être surmontée d'un recouvrement préalable ayant ces propriétés, puisque le basalte ne les possède pas d'origine, et se trouver au-dessus du niveau hydrostatique.

- 2 - Origine possible de ce recouvrement préalable : les pyroclastites et certaines variétés de limons peuvent convenir, les autres roches (dont les laves) étant exclues (voir I et II).
- 3 - Coupe synthétique en terre rouge : plateau à nappe phréatique profonde ; la surface est plate, sans talweg, les versants très arrondis dominant les affleurements de nappes. De haut en bas, la coupe s'ordonne ainsi :
- horizon A : - à peu près inexistant (très peu d'humus)
 - " B₁ - caractérisé par une terre rouge homogène à structure fine, puissante de 0 à 15 m et plus.
 - " G - niveau lenticulaire de graviers, fragments de ponce ferrugineux, minéraux (paragénèse des gîtes), quartz peu ou pas roulés.
 - " B₂ - semblable à B₁ mais passant progressivement à une profondeur très variable à C₀.
 - " C₀ - zone de départ ; roche versicolore (verte, violette, grise ou brune) de plus en plus humide, à structure de roche basaltique de plus en plus reconnaissable, jusqu'au basalte altéré.

Suivant l'état du drainage, il peut se former des canaux de plus en plus ramifiés et fins vers le bas, remplis de terre rouge enserrant des morceaux polyédriques de basalte altéré, décoloré, qui disparaissent rapidement vers le haut ; le passage du basalte altéré à la terre rouge est brutal.

Si la topographie est calme, le niveau G amplifie les ondulations de la surface ; les talwegs profonds, au contraire, l'entaillent et il affleure sur les pentes.

4 - Constitution des terres rouges :

Granulométriquement, la terre rouge est formée en majorité d'argiles à moins de 1,2 micron (55 %), de limons (32 %), de sable fin (12 %) et très peu de sable (1 % à moins de 1 mm). Ces produits ne sont absolument pas classés.

Le gravier ne se distingue que par une certaine abondance de cailloux. C₀ évolue progressivement vers la granulométrie des scories et roches altérées.

Minéralogiquement, la seule argile rencontrée est la kaolinite. Les minéraux de la fraction grossière sont le quartz, la limonite, l'oligiste, l'hématite, l'ilménite, le rutile, la céladonite et les gemmes (zircons, corindons, grenats, picotites, titanomagnétites) présents partout, mais surtout concentrés dans le gravier G.

5 - Teneurs en éléments traces des terres rouges :

Le Chrome : plus abondant dans les scories que les laves, le chrome est encore plus concentré ici, jusqu'à 1.000 ppm avec un maximum dans le gravier.

Le Vanadium : la teneur est plus grande que dans le basalte et diminue du haut vers le bas du profil (430-350 ppm, 250 dans les basaltes)

Le Zirconium : est à très forte teneur dans la terre rouge (800 à 600 ppm), décroissant de haut en bas faiblement, avec un maximum secondaire au niveau du gravier (dosage excluant les macrozircons et n'intéressant que la fraction fine de la terre). Ces caractéristiques se vérifient pour d'autres massifs de terres rouges.

6 - Anomalies dans les gisements de terres rouges : La superposition basalte-terre rouge n'est pas toujours réalisée :

On connaît de multiples coulées sans recouvrement, certaines voisinant avec des plateaux de terres profondes, et des amas de terres rouges en couverture directe du substratum. L'épaisseur moyenne de la terre rouge diminue progressivement en s'éloignant du centre d'émission jusqu'à disparaître totalement sur les coulées de plateau les plus éloignées. Des amas de terres reposent même sur certains replats des volcans.

7 - Genèse probable à partir des pyroclastites : toutes les mesures et observations précédentes amènent à considérer les terres rouges comme dérivant de l'altération profonde de champs de pyroclastites (horizon B₁) qui se poursuit ensuite dans le basalte sous-jacent mis en condition (horizon B₂).

8 - Les diverses carapaces : le niveau de gravier peut être parfois confondu avec d'anciennes cuirasses sous des d'accumulation absolue antérieures à la terre rouge et recouvrant la coulée sous-jacente.

Au bas des pentes, à proximité de la nappe phréatique, le basalte altéré ou la terre rouge inférieure (B₂) peuvent passer à une carapace molle bariolée se transformant en cuirasse très vacuolaire à l'affleurement (influence du lessivage oblique, battement des nappes, remontées périodiques de l'oxydation en période sèche, etc...) puis à l'argile bleue sous l'eau et aux cuirasses d'alluvions dans certains cas.

Au-dessus, la terre rouge comprend de nombreux morceaux informes de basaltes ferruginisés et de "pseudoconcrétions", cloisons de carapace vacuolaire désagrégée en haut.

Près du niveau hydrostatique au bas des fortes pentes, la terre rouge à une structure concentrique avec des noyaux de basalte altéré passant directement à la terre rouge : autre cas de décomposition écailleuse (étudiée en détail par E.M. Castagnol).

- 9 - Le problème du gravier, éluvion et colluvion fossiles : suivant la position des talwegs, le gravier peut rester enfoui ou affleurer en placers de pentes, ou bien encore passer en continuité avec les alluvions, quelques fois elles-mêmes fossiles sous la terre rouge. Etant donné sa position et sa composition granulométrique et minéralogique, ce gravier dérive certainement d'éluvions et colluvions fossilisées par le dépôt postérieur de la terre rouge. Il serait intéressant de comparer ce gravier avec les "stones-lines" trop peu souvent décrites en Asie du Sud-Est.
- On connaît des éluvions actuelles qui lui ressemblent : le gisement de Païlin (Cambodge Occidental) est situé dans la couverture d'altération de coulées de limburgite, non recouverte de terres rouges.

CHAPITRE 4

ETUDE PALEOMAGNETIQUE ET ESSAI DE CHRONOLOGIE ABSOLUE

- 1 - Les tectites : certaines de ces pierres d'origine controversée, âgées de 600.000 ans selon les auteurs, ont été trouvées dans des graviers au-dessus des grandes coulées de base. On n'en a jamais trouvées dans les coulées supérieures ni sur les cônes volcaniques.
- 2 - Le Quaternaire : les études géomorphologiques ont distingué plusieurs plate-formes d'érosion et niveaux de terrasses sur lesquelles les basaltes se sont répandus : la principale, à la cote 180-200 m supporte les premières coulées ; on l'attribue au Quaternaire ancien en Indochine. Le volcan de Bo Khâm repose sur la terrasse la plus récente de la Sé San.
- 3 - Etude paléomagnétique : l'étude d'un certain nombre d'échantillons bien choisis a montré qu'il existait deux groupes :
- N : groupe à sens magnétique normal d'inclinaison + 20° (I actuelle + 26°)
 R : groupe de sens inversé d'inclinaison - 25°
- R contient des coulées considérées comme base du plateau.
 N contient tous les produits des coulées supérieures et des volcans, groupe plus disparate.
- La limite d'inversion la plus récente est âgée de 700.000 ans, la précédente de 2,3 M années.

4 - Les diverses phases du volcanisme : la synthèse de tout ce qui précède permet de reconstituer plusieurs phases du volcanisme :

a - épanchements fissuraux le long de trois fractures principales N-S (Ban Loung, Thong Samoth, Bo Loi-Bo Kéo, Ban Chay), zones de faiblesse du substratum, d'âge inférieur à 2,3 Ma et proche de 700.000 ans.

b - transformation du volcanisme continental par dispersion des centres d'émission et épanchement de multitudes de coulées plus petites dont certaines ont débordé les anciennes déjà entaillées par l'érosion.

c - stade terminal, avec des éruptions de type explosif pur créant les nombreux petits volcans individualisés, les cratères d'explosion et répandant les champs de pyroclastites actuellement transformées en terres rouges. Ce stade s'est prolongé jusqu'au Quaternaire récent.

d - extinction définitive ; aucune manifestation n'est vivante à l'heure actuelle.

Cette évolution semble très classique dans le volcanisme continental quaternaire.

5 - Le problème des charbons de bois : dans certains gisements, l'exploitation remonte au jour des fragments de brindilles carbonisées, parfois silicifiées gisant jusqu'à plus de 10 m de profondeur dans le gravier : ces charbons pourraient provenir des résidus carbonisés de la végétation détruite par le dépôt des cendres et pyroclastites de l'horizon B.

Malheureusement, les essais de datation au Carbone 14 ont toujours échoué dans ce milieu ferrallitique. Est-ce le résultat de pollutions naturelles ?

IVème PARTIE

MINERALOGIE ET GEOLOGIE DES GISEMENTS DE ZIRCONS

CHAPITRE 1

ZIRCONIUM, HAFNIUM, ZIRCON

(résumé des caractéristiques et propriétés physiques ou chimiques)

CHAPITRE 2

LOCALISATION ET DIVERS TYPES DE GISEMENTS DE GEMMES

- 1 - Gisements primaires de zircons-gemmes : toutes les gemmes ont été recueillies dans les laves et scories d'appareils ou dans les éluvions, alluvions et graviers des terres rouges sur le pourtour de nombreux volcans. Mais leur rareté enlève tout intérêt économique aux gîtes primaires.
- 2 - Divers types de gîtes secondaires : heureusement les divers processus naturels de concentration ont contribué à la formation de gîtes exploitables de gemmes. On distingue :
 - des placers de pente sur les versants des volcans
 - des gîtes en colluvions et alluvions actuelles
 - des gisements fossiles (niveau G enfoui sous la terre rouge B₁) comprenant,
 - + des gîtes de plateau horizontaux dans le niveau G,
 - + les gîtes de rupture de pente, moins profonds où la terre rouge a été partiellement érodée en bordure des plateaux,
 - + les placers de pente en horizon B₂, alimentés par G érodé,
 - + les placers de bas de versant et alluvions fossiles, où le niveau G se raccorde à des alluvions fossilisées par la terre rouge B₁.
- 3 - Paragénèse des gisements de gemmes : par ordre de teneur décroissante, les minéraux constitutifs comprennent des concrétions et pseudo-concrétions ferri-ferriques, des éjecta divers (ponces, fragments de quartz, enclaves de substratum ou de périclase) des titanomagnétites, des cristaux d'anorthose, des zircons, des picotites et chromopicotites, des corindons (bleus ou verts, rarement des rubis), des grenats pyrope des charbons de bois, des fragments

- 4 - Genèse probable des gisements fossiles : liés à la terre rouge, leur genèse est la même ; ce sont d'anciens gîtes superficiels, éluvionnaires et colluvionnaires, voire alluvionnaires formés, comme à Païlin, à la surface des coulées autour des volcans et sur leurs pentes et fossilisés par la terre rouge.

CHAPITRE 3

MINÉRALOGIE DES GISEMENTS : LES ZIRCONS

I - CRISTALLOGRAPHIE

- 1 - Structure des cristaux (diagrammes de poudre et diffractogrammes)
Tous les films sont identiques et les raies parfaitement nettes et classiques : (112) est placée en $2\theta = 35,63^\circ$.
La structure est donc parfaite sans trace de métamictisation.
- 2 - Cristallographie : on observe plusieurs aspects et les cristaux ont des formes anguleuses et complètes, ou incomplètes, des cavités arrondies, des stries obliques (331) sur (110), des trémies d'accroissement selon (101), des bourgeons sur (111), etc...

Les formes les plus fréquentes sont le prisme (110) terminé par la bipyramide (111) (octaèdre quadratique, type 2 de A. Lacroix).

L'aplatissement du prisme atteint 1,5, la pyramide est donc souvent en forme de toit.

Le prisme (100) est très rare, la bipyramide (101) n'est jamais observée, la bipyramide (331) ne donne que des troncutures.

Les cavités sont arrondies, rarement polyédriques, sans rapport avec les faces ce sont des empreintes de corps étrangers et non des corrosions.

Le seul clivage est (110) plus ou moins bon.

Les plus gros cristaux portent des cupules de percussions et des traces de poinçonnage à haute température. Ils se dépolissent vite et ne supportent pas un long transport.

Les défauts internes sont nombreux (paillettes, zones brumeuses, inclusions, coeurs formés d'agglomérats de cristallites, variations de couleur, etc...).

Tous ces éléments témoignent d'une cristallisation en milieu tourmenté, partiellement cristallisé, mais de composition sensiblement constante d'un gisement à l'autre, d'un refroidissement rapide et d'un transport à haute température particulièrement violent tel qu'en produit une éruption volcanique avec projections.

II - MORPHOLOGIE

- 1 - Paramètres caractéristiques : la morphologie est définie par les auteurs à l'aide des paramètres suivants :
 - $B = a_1$ plus grand que a_2 , mesurés selon les axes binaires sur plat
 - $C = L$ = longueur du cristal selon l'axe c mesurée sur le cristal ou sur une section en lame mince
 - $n = a_1/a_2$ = coefficient tabulaire, rapport des deux mesures selon les axes binaires de 2ème espèce.
 - $L/B = C/a_1 = m$ = coefficient colonnaire.
- 2 - Nature des échantillons mesurés : pour les mesures statistiques, on a utilisé des cristaux mesurant plus de 2 mm et de 2 origines différentes :
 - Groupe A = mélange de produits d'exploitation des divers gisements (200 échantillons)
 - Groupe B = lots provenant d'une prospection systématique d'une partie du gîte de Bo Hei à Bo Kéo (137 échantillons de plus de 5 mm et 73 compris entre 5 et 2 mm). Les cristaux plus petits sont souvent des fragments et ne sont pas mesurables au pied à coulisse.
- 3 - Résultats :
 - $L = f(a_1)$: le diagramme donne un nuage de points d'axe $L = 1,4 a_1$ avec une excellente superposition des divers lots.
 - n , coefficient tabulaire : l'histogramme donne un maximum absolu de $n = 1,00 - 1,09$ (28 à 32 %) et un maximum relatif à $n = 1,90 - 1,99$ (17 %), dû au clivage.
 - m , coefficient colonnaire : les valeurs extrêmes sont 0,9 et 2,7, donc très rapprochées (des groupes de zircons d'autre origine donnent des fourchettes de 0,5 à 6 ou 0,5 à 10!). L'histogramme donne un maximum net pour $m = 1,40 - 1,49$ de 16, 1 % pour A et $m = 1,2 - 1,6$ de 65 % pour B (1,2 - 1,7 et 63-69 % pour les fractions fines).
 - La valeur à retenir ici est donc encore de 1,4
 - L et a_1 : la proportion des cristaux augmente de façon continue quand leur dimension diminue, la courbe de fréquence est normale, ce qui est un argument en faveur de la cristallisation dans le magma en cours de refroidissement assez rapide et l'absence de transport avec classement granulométrique ; la courbe est très étalée puisque L peut atteindre 53,6 mm et se place fréquemment à 10 mm et au-dessus. Toutes les valeurs sont possibles jusqu'à 0 dans les fractions qui n'ont pu être retenues (moins de 2 mm). Ceci laisse supposer que, de plus, le milieu réunissait des conditions physico-chimiques semblables aux conditions pegmatitiques ou pneumatolytiques, conditions que l'on trouve réunies dans le volcan en cours d'éruption.
- 4 - Groupe cristallographique et morphologique : tous les zircons des gisements forment donc un groupe très homogène aux caractéristiques nettement définies :

Prisme 110 et bipyramide 111, type 2 de Lacroix
 $a_1/a_2 = 1$, $L/a_1 = 1,4$, $L = 0$ à 54 mm et plus

III - PROPRIETES PHYSIQUES

- 1 - Densité : elle est très proche de la densité théorique de 4,67
- 2 - Indice et biréfringence : maxima, $n_g = 1,99$ $n_p = 1,93$ $n_g - n_p = 0,06$

- 3 - Couleurs et luminescence : les zircons habituels sont du type jarcon (brun rouge) rarement hyacinthe (rouge) ou incolores (rares dans tous les gisements, seuls constituants du gisement de faux-diamants de Bo Pay Nang dans la trachy-andésite à oligoclase (diamants de Matura).

Les divers éléments traces, causes possibles de la couleur ont été dosés : Cr = 67-19 ppm, V = 26 - 6 ppm, Mn = 1040 - 780 ppm, U = 0,4-3,3 ppm (12 ppm pour un zircon rouge de Madagascar), Th inférieur à 50 ppm pour tous.

Les zircons les plus riches sont les plus colorés, pour tous les éléments.

Par chauffage, on obtient une thermoluminescence rouge orangé vers 300°. La coloration est réversible ; puis le zircon devient jaune, puis bleu et enfin blanc, ces dernières couleurs étant irréversibles.

La couleur bleue est toujours artificielle (faux saphirs clairs riches en feux), c'est un secret de fabrication ; elle vire facilement au bleu-vert.

Les zircons bleus contiendraient du cuivre et du zinc ?

- 4 - Autres propriétés : aucune fluorescence U.V. n'a été décelée, ni aucune radio-activité.

Sous l'impact du faisceau de la microsonde, le zircon émet une cathodo-luminescence mauve, moins intense que celle de l'Apatite.

IV - COMPOSITION CHIMIQUE

- 1 - Eléments majeurs : la composition est toujours proche de SiO_4Zr . Les autres éléments sont : P, Mg, Fe, Ca, Na, K, parfois, Al, Ti, et C qui proviennent le plus souvent d'inclusions.

- 2 - Eléments traces : hormis les 5 éléments dosés quantitativement (Cr, V, Mn, U, et Th), l'analyse qualitative donne les appréciations suivantes :

+++ = Hf, Y, U, Th, La

++ = Yb, P, Al, B

+ = Eu, Gd, Be (quelques échantillons seulement)

0 = Be, Nd, Lu, S ; Pb, Zn, Cu

Teneur en Hafnium : l'appareil utilisé ne pouvait doser des teneurs inférieures à 0,3 %. Deux échantillons seulement ont dépassé ce seuil (0,4 et 0,6). Le rapport Zr/Hf est donc presque toujours supérieur à 140.

V - INCLUSIONS

- 1 - Aspects et formes : très souvent, ces inclusions sont des titanomagnétites en tablettes rectangulaires et des plages xénomorphes biréfringentes orientées dans (110), des minéraux altérés ou des fragments de mésostase basaltique.

- 2 - Nature et composition : La plupart des minéraux sont altérés par suite de la communication de l'inclusion avec l'extérieur.

Une enclave analysée à la microsonde contenait :

Calcite, Feldspath alcalin ($\text{Or}_{50}\text{Ab}_{50}$), augite, oxydes de fer ; la calcite était entourée de ZrO_2 Baddeleyite au contact du zircon, donnant une très forte luminescence bleue claire.

Cette particularité sera discutée plus loin.

CHAPITRE 4

MINÉRALOGIE DES GISEMENTS : AUTRES MINÉRAUX

- 1 - Les corindons (saphirs et rubis) : ces minéraux, rares dans certains gisements, donnent dans d'autres des gemmes de valeur (saphirs de 1ère qualité, rubis de 2ème qualité).
 Les prismes à section hexagonale, aplatis ou allongés, peuvent atteindre 2 cm de long ; les faces sont souvent courbes (barilletts) avec des bourgeons et des empreintes. La couleur est bleue, rarement limpide, bleu-vert, rarement rouge (rubis). Les propriétés physiques sont classiques.
 Du point de vue chimique, ces minéraux contiennent des éléments de roches basiques en très faible quantité (Ni, Co, Cr). Le rapport Al/Ga est supérieur dans les gemmes (1.560 contre 1.200 à 1.350).
 La teneur en fer est très variable.
- 2 - Les grenats : plus rares que les corindons, ces gemmes rouge foncé sont des pyralspites riches en éléments de roches basiques (Ni, Cr, V) plus pauvres en Co et Ca que les corindons.
- 3 - Les titanomagnétites : constituants essentiels du gravier, les magnétites ont une taille exceptionnelle qui dépasse souvent le cm.
 Les grains sont isométriques, rarement automorphes à surfaces concaves parfois vésiculaires (voir la composition chimique au chapitre Pétrographie). Ce sont des constituants normaux des basaltes alcalins, mais ici ils ont une très grande taille.
- 4 - Les picotites : beaucoup plus rares, ce sont des gemmes de moindre valeur. On récolte quelques beaux octaèdres de grande dimension (2 cm) d'un beau noir anthracite. Ce sont des constituants normaux des roches ultrabasiques grenues, mais ici de grande taille.

CHAPITRE 5

PARTICULARITÉS DES GISEMENTS PRIMAIRES - GEOCHIMIE DU ZIRCONIUM

I - LIAISON AVEC LE VOLCANISME

Il existe des zircons-gemmes en place dans les laves et scories. Les gisements se sont formés par érosion et concentration des minéraux lourds à partir des basaltes et scories à l'exclusion de toute autre possibilité d'apport extérieur.

C'est donc le volcanisme qui a amené les minéraux de la paragenèse.

II - PARTICULARITES DES MINERAUX DE LA PARAGENESE

- 1 - Cristallographie et Morphologie : les zircons de Ratanakiri forment donc un groupe très homogène, donc monogénique, typique des magmas basiques (coefficient colonnaire compris entre 1 et 2) et des roches alcalines (prédominance de la forme 2, prisme bipyramidé 110, 111). Ils ne ressemblent pas aux zircons du substratum et ne sont pas métamictes.
- 2 - Composition chimique : un des caractères du groupe est la pauvreté en éléments lithophiles, U, Th, Nb, Ta, Y, Pb, Cu, Zn, qui les distingue nettement des zircons du socle, et en Hafnium, telle que le rapport Zr/Hf place le groupe à l'extrémité du tableau des roches, avec les syénites néphéliniques (Zr/Hf = 60 - 150). Mais les syénites alcalines contiennent des éléments lithophiles absents ici.

Ces zircons ne peuvent provenir de la contamination de magmas basaltiques par des roches à zircons. Au contraire, leurs propriétés sont semblables à celles des zircons d'autres massifs basaltiques alcalins : Chantaboun au Siam, Païlin au Cambodge occidental, Taïwan, Madagascar.

- 3 - Les Inclusions : les inclusions sont formées des minéraux du basalte ; elles contiennent des feldspaths potassiques, ce qui semble indiquer que le bain résiduel était riche en potassium. Donc la cristallisation du zircon se place en fin de séquence, après la cristallisation des augites et feldspaths de haute température et avant celle de la calcite (le milieu résiduel ne contenait que CO_3Ca et ZrO_2 qui cristallise en baddeleyite).
- 4 - Origine des autres minéraux : les teneurs élevées des grenats en Cr, Ni, et V indiquent seulement une origine basique ou ultrabasique.

Les spinelles sont plutôt des minéraux accessoires de roches ultrabasiques (péridotite) ou des cristallisations précoces du basalte (chromopicotite).

Les corindons posent un problème en raison de la pauvreté en alumine du massif ; cependant on les rencontre dans les magmas désilicifiés par des roches profondes (dolomies, carbonatites, ultrabasites etc...) ou dans les roches alcalines sous-saturées (miasmites) qui pourraient dériver des magmas alcalins de Ratanakiri. La présence de Zirconium amènerait à penser aux carbonatites qui en contiennent en général.

III - GEOCHIMIE DU ZIRCONIUM DANS LE MASSIF

- 1 - Relations entre les teneurs en zirconium et d'autres facteurs

- Indice de solidification ($M = \text{s. i.}$) : $\text{Zr} = 1.700 - 33 M^{+150} \text{ ppm}$
- teneur en chrome : pour M supérieur à 32, $\text{Zr/Cr} = 1.60$ environ (pour M inférieur à 32, la cristallisation fractionnée a éliminé la quasi totalité du chrome). Dans les terres rouges, plus riches, le rapport est variable : $\text{Zr/Cr} = 0.40$ à 1.10 .
- teneur en potassium : $\text{K/Zr} = 24.2$ en moyenne (de 25,6 à 28, avec des valeurs extrêmes de 14,2 et 39,6, le groupe alcalin sodique faisant exception avec 14 en moyenne).

La teneur en zirconium est donc nettement liée à la teneur en chrome, ce qui laisserait supposer que les deux éléments ont la même origine dans le magma originel. Par comparaison, dans les tholeiites océaniques il

vaut en moyenne 0,32 et 5 dans les basaltes alcalins océaniques (A.E.J. Engel).

La teneur en zirconium est nettement liée à la teneur en potassium ; cette particularité tient à la faculté commune aux deux éléments de se concentrer dans les bains résiduels et non à une origine commune difficile à imaginer.

2 - Teneur en zirconium des minéraux et enclaves :

Il n'y a pas de concentration notable de zirconium dans le substratum et les enclaves du socle.

Les teneurs suivantes ont été mesurées :

- enclaves de péridotite : 19 et 57 ppm (roches encaissantes, 320 & 485)
- Biotitite : moins de 10 ppm, aucune inclusion de zircon visible.
- Anorthose : 10 et 180 ppm
- fond : la teneur n'atteint jamais une valeur mesurable à la microsonde (1.000 ppm au moins)
- autres minéraux : aucune teneur mesurable à la microsonde.

3 - Localisation du zirconium dans les laves : les petits zircons : d'après divers travaux, tous les minéraux peuvent inclure un peu de Zr dans leur réseau mais jamais en quantité suffisante pour "éponger" la teneur globale de la roche (augite, diopside, orthopyroxène, biotite, aegyrine surtout jusqu'à 3 ou 4 %).

D'autre part, toutes les analyses minéralogiques ont montré la présence de zircons dans les produits d'altération.

Effectivement, quelques petits grains sont visibles dans le verre ou la mésostase de beaucoup de lames minces.

Il est donc certain que le zirconium a cristallisé en fin de séquence sous la forme de petits zircons.

Vème PARTIE

ECONOMIE DES GISEMENTS

CHAPITRE 1

LES DISTRICTS MINIER

Les caractères des gisements et indices et leur distribution spatiale permet de les classer en districts et en centres de production.

Un centre est en général formé d'un volcan autour duquel se répartissent les gîtes de diverses catégories déjà décrites.

Un district est un groupement de centres voisins.

C'est encore une particularité de Ratanakiri, les autres régions productrices du monde étant généralement formées d'un seul district, voire d'un seul centre.

Les divers districts sont :

- Bo kéo (centres de Bo kéo, Nheun Ktê, Phnom Pa Ngay)
- Bo Loi (Phnom Ka Loeu, Phnom Lolok)
- Bo Noac (Phnom Ka Loeu, Prachun Nhay, Phnom Hayet)
- Bo Tum (Bo Tum, O Chram, O Phao, O Plong)
- Ban Tang, La Eune, Loung Khoung Paor, Kes Chong, etc...

CHAPITRE 2

PROSPECTION SYSTEMATIQUE : GITE DE BO HEI, BO KEO

Sur 31 hectares de ce gisement de plateau et de rupture de pente, nous avons pu mettre en évidence des réserves de :

6.100 kilogrammes de pierres pour joaillerie

19.500 kg de zircons minéral, récupérables.

soit 1.500.000 carats de zircons de tailles diverses.

Etant donné le prix de vente production des pierres brutes, ce gisement ne peut faire l'objet d'une exploitation industrielle, mais peut être travaillé en coopératives après amélioration des méthodes artisanales déjà employées.

CHAPITRE 3

1 - Régime minier et commercial (voir le détail dans le texte original)

2 - Méthodes d'exploitation :

- Gisement de plateau : puits circulaires de 80 cm de diamètre foncés jusqu'au gravier sans soutènement (excellente tenue des terres rouges).
Extraction par balancier à contre-poids, corde et panier.
Equipe de deux hommes, avancement moyen de 2m/jour (70 Riels/jour)
Tri manuel à sec (femmes et enfants de mineurs).
Volume de gravier : 0,5 à 5 m³ par puits.
Valeur de la production très variable, de 0 à 1.000 Riels, rarement 10.000, exceptionnellement 50.000 Riels.
Profondeur limite : 12 à 15 m, exceptionnellement 20 m.

- Exploitation en lit mineur : fouilles de toutes formes, rarement avec exhaure.

Débourbage, tamisage et tri manuel dans l'eau.

- Exploitation en carrière : bas de pente et alluvions au-dessus du niveau hydrostatique.

Captages en amont, canal d'amenée d'eau et ground sluicing.

C'est la méthode la plus prometteuse, car elle évite l'écramage des gisements comme la méthode par puits qui ne prélève que 10 ou 20 % du gravier. Elle peut être étendue aux gisements de plateau par l'emploi de moto-pompes, et donner un fort rendement par ouvrier, sans demander de gros investissements.

3 - Commercialisation : Les circuits commerciaux traditionnels sont complexes. La contrebande incontrôlable est très importante.

Les unités de mesure sont : le CHI (18 carats) et le HUN (1,8 carats)

Les pierres de moins de 3 Hun sont vendues 100 Riels le kg.

Les autres, sont classées en catégories suivant leur grosseur et leur qualité :

0,3 - 0,8 CHI	800 Riels le Chi, pierre de 1 Chi, zircon blanc, Bo Pay Nang
0,8 - 1,0 -	100-500 \$ le Chi, zircon blanc de 1 Chi autre origine
1,0 - 2,0 -	250-500 \$ le Chi, pierre de 1 Chi, rouge ou brun
plus de 2 -	500-800 \$ le Chi, pierre de 1 Chi, pierre rouge de Bo Loi
	50 \$ le Chi, pierre noire de 1 Chi (picotite)

Ensuite, le prix ne croît pas comme le carré du poids, à qualité égale, mais un peu moins vite.

Une pierre exceptionnelle, trouvée en Janvier 1966, de 150 Chi, s'est vendue 50.000 Riels départ production.

Les pierres trop défectueuses sont vendues au kg comme les petites.

Statistiques :

2/3 à 5/6 de la production sont irrémédiablement jetés (65 à 85 %)

90 % du reste est vendu au kg.

10 % seulement est taillé et vendu à l'unité, soit 2,5 % de la production brute.

Evolution : les prix et les chiffres indiqués ont des taux de fluctuation très importants (la base est ici 1966). Dans l'ensemble les prix montent assez vite.

La création de la Société nationale SONEXPIEROR les fixera à un niveau plus élevé en faisant bénéficier la production d'une partie des superbénéfices spéculatifs antérieurs, puis introduira un élément de stabilité favorable à la mise en exploitation rationnelle.

- 4 - Production : en 1966, la production globale était impossible à évaluer avec les moyens limités d'un simple enquêteur. Les statistiques officielles mentionnent une moyenne de 1.200 à 1.500 kg en 1965 et 66, sans indication de valeur (190.000 Piastres en 1937).

CHAPITRE 4

CONCLUSIONS ECONOMIQUES

L'activité minière se poursuit depuis plus de 40 ans, c'est dire l'intérêt qu'il faut porter aux possibilités de Ratanakiri.

Les carrières étant exceptionnelles, les gisements sont loin d'avoir été entièrement exploités.

L'irrégularité des teneurs et des valeurs n'autorisent pas d'exploitation industrielle, mais l'organisation de coopératives artisanales peut redonner de la vigueur à cette activité bénéfique pour cette région isolée.

VIème PARTIE

CONCLUSIONS GENERALES

- 1 - Etude géologique régionale : les travaux de la Mission Minière à Ratanakiri ont permis de compléter la connaissance géologique et minière d'une région isolée et particulièrement délaissée, malgré sa position privilégiée au contact du socle paléozoïque et de la couverture secondaire et malgré ses possibilités minières.
- 2 - Définition du groupe monogénique des zircons des basaltes alcalins : ce groupe particulièrement homogène se distingue par des cristaux atteignant de grandes tailles, un habitus particulier et des propriétés physico-chimiques concordantes :
 - Structure intacte, prisme bipyramidé (110), (111), $L/a_1 = 1,4$
 - Couleur brun-rouge, jaune, incolore ou rouge
 - Pauvreté en éléments lithophiles : U, Th, (quelques ppm seulement) terres rares, Y, Cu, Pb, Zn, Be, etc,
 - Pauvreté en Hf telle que le rapport Zr/Hf atteint des valeurs extrêmes supérieures à 140
 - Présence de Cr et V (quelques unités ou dizaines de ppm) et de Mn (de 500 à 1.000 ppm) plus ou moins proportionnelle à l'intensité de la couleur.

Les irrégularités, défauts, inclusions, traduisent une cristallisation tardive en milieu agité et un transport à chaud au cours des éruptions.

- 3 - Paragénèse surprenante mais fréquente + cristallogénie : les zircons-gemmes cohabitent toujours avec des titano-magnétites, des picotites-gemmes, des grenats pyralspites, des corindons-gemmes (saphirs et rubis), des anorthoses, des fragments de péridotite, des ponces et quelques morceaux de biotite : c'est un mélange de minéraux de départ basique et de départ alcalin qui caractérisent les trachybasaltes.

Les diagrammes d'équilibres complexes $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{etc.}$ montrent la possibilité de cristallisation simultanée de spinelles, corindons, grenats non calciques et olivines dans des magmas basiques et alcalins comme celui de Ratanakiri mais à une température supérieure à 1.200° . Dans les volcans basaltiques on relève des températures supérieures à 1.300°C , en présence de minéralisateurs, avec de rapides variations de pression qui favorisent sans doute l'abaissement des eutectiques et l'instauration de conditions, que je nommais pneumatolytiques, favorables à la formation de minéraux de grande taille.

Les anorthoses et les plagioclases potassiques témoignent également de hautes températures au moment de leur cristallisation. Le rapport Or/Ab reproduit le rapport K/Na du bain résiduel qui augmente rapidement avec le refroidissement.

De même, la teneur en titane des magnétites augmente, puis cet élément cristallise sous forme de sphène quand la teneur en silice est suffisante.

L'ordre de cristallisation semble être le suivant : corindons, grenats, spinelles, titanomagnétites, anorthose et enfin zircons, les trois derniers minéraux cristallisant aussi dans les coulées en dessous de 1.000°C .

Les corindons auraient encore pu se former au cours d'une désilicification hypothétique du magma basaltique par une roche ultrabazique, dolomie ou carbonatite dont aucune trace n'a pu être observée.

Cette paragénèse se retrouve dans tout le Sud Est Asiatique et en de nombreux massifs de basaltes alcalins du monde.

- 4 - Description du massif volcanique de Ratanakiri, de morphologie classique au Quaternaire mais de chimisme curieux : en effet, les massifs basaltiques alcalins du Quaternaire comprennent souvent des plateaux étendus, mais de faible puissance, hérissés d'une multitude de petits volcans traduisant une évolution rapide vers une activité fortement explosive et très dispersée.

D'autre part, s'explique difficilement la richesse du magma en éléments aussi divers que le magnésium, le fer, le phosphore, le chrome et le zirconium. En l'état actuel des choses, on ne peut trancher entre l'hypothèse d'un magma original et l'hypothèse d'une contamination par une roche alcaline basique, dont il ne resterait aucune trace.

Quoiqu'il en soit, la série magmatique de Ratanakiri présente les caractères suivants :

- Série alcaline sensu stricto (basaltes et trachy-basaltes à olivine)
- Indice de Peacock = 47,5
- Alkali-Lime index = 27,5 ou indice de H. Kuno
pour $\text{CaO} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7\%$
- Isofalie, si = 158
fm = al = 31
- Basalte moyen III 5 3 4 (2 2 2 2)
- Teneur en Zirconium = 525 en moyenne (275 à 1.180 ppm)
teneur en chrome = 100 à 270 ppm
rapport Zr/Cr voisin de 1,60 pour les roches les moins évoluées
- Rapport K/Zr = 24 en moyenne
- Rapport Na/K = 1,73 en moyenne
- Indice de solidification moyen S; i; = 35 (de 18 à 50)
- Pyroclastites plus riches en chrome et en zirconium.

- 5 - Première étude géologique des terres rouges : sur l'exemple de Ratanakiri, j'ai pu montrer que ces terres profondes dérivait d'un processus particulier d'altération ferralitique des produits basaltiques exigeant une couverture préalable de pyroclastites qui forme le premier niveau.

Ces terres contiennent presque toujours un niveau intercalaire de graviers, éluvions ou colluvions fossilisés par les pyroclastites et gangue des gisements de gemme. Ce niveau est bien développé à la périphérie des volcans, gisements primaires des gemmes et minéraux associés.

- 6 - Etude économique partielle des gisements de gemmes de Ratanakiri : les résultats obtenus permettent de dresser un inventaire assez complet des indices, gisements en cours d'exploitation et gisements abandonnés, tous répartis autour des volcans.

Les teneurs appréciées par enquêtes ou mesurées directement en prospection systématique montrent l'intérêt de cette province minière, mais démontrent également l'impossibilité de promouvoir une exploitation industrielle avec de gros investissements. En revanche, il est nécessaire de mettre au point des méthodes artisanales d'exploitation dans le cadre de coopératives ouvrières et d'organiser la commercialisation pour éviter la spéculation et l'exploitation des producteurs par les intermédiaires.

Enfin, ces méthodes d'exploitation doivent avoir pour base l'exploitation en carrières et le ground sluicing ou tout autre procédé équivalent afin d'entraîner le traitement de la totalité du gravier et non pas son écrémage comme le font les procédés actuels par puits ou fouilles.

